

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Láser de fibra óptica dopada con tulio

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA



Curso 2016/2017

Alumno:

Enar FRANCO RODRÍGUEZ

Directores:

Sebastián Jarabo Lallana

Francisco Javier Salgado Remacha

A la Banda del Viento metal, por su canción eterna. 🌀

Quisiera dar las gracias a los directores del presente trabajo, Sebastián Jarabo Lallana y Francisco Javier Salgado Remacha, por su guía en un proyecto que ha supuesto el redescubrimiento de mi pasión por la física.

Asimismo, quisiera también agradecer al Departamento de Física Aplicada, y en particular a José Eduardo Saldaña Díaz, por su inestimable ayuda durante las sesiones de laboratorio.

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	4
3. Instalación experimental	5
3.1. Etapa de bombeo operando en modo continuo	5
3.2. Etapa de bombeo pulsado mediante mode locking	8
3.3. Láser de fibra dopada con tulio: cavidad	11
3.3.1. Calibrado del acoplador WDM 1600/2000	11
3.3.2. Calibrado del aislador óptico	12
4. Resultados	13
4.1. Láser de bombeo operando en CW	13
4.1.1. Espectros de salida	13
4.1.2. Recta característica	14
4.1.3. Influencia de la relación de acoplo	15
4.2. Láser con bombeo pulsado mediante mode-locking	17
4.2.1. Espectros de salida	17
4.2.2. Recta característica	18
4.3. Comparativa CW/mode-locking	19
4.4. Medidas de ganancia espectral	20
5. Conclusiones	23
6. Bibliografía	24

1. Introducción

Desde la década de 1970 se han desarrollado líneas de investigación buscando crear fuentes de emisión láser en la región de $2\ \mu\text{m}$, con el objetivo de explotar las diversas propiedades que podemos encontrar en esta zona del espectro, entre cuyas aplicaciones podemos encontrar:

- La utilización de dispositivos láser pulsados (tanto mediante Q-switch como por encadenado de modos) como fuentes de bombeo para aceleración de partículas, sistemas LIDAR de baja potencia (eye-safe), y generación de frecuencias ubicadas en el infrarrojo medio (mid-IR) mediante conversión no lineal. Las altas potencias alcanzadas por los pulsos permiten la conversión a longitudes de onda más largas de forma sencilla y eficaz [1].
- Absorción en agua: Una de las frecuencias de vibración en los enlaces fundamentales O-H en la molécula de agua se da en torno a los $1950\ \text{nm}$ [2], esto es, muy cerca del máximo de emisión que presentan los láseres de tulio (como observamos en la figura 1). Esta molécula está más que presente en diversos compuestos orgánicos e inorgánicos, lo que aumentará su absorción en la región de $2\ \mu\text{m}$.

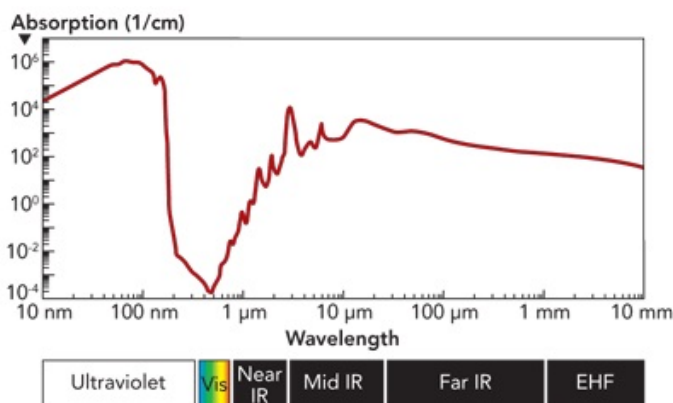


Figura 1: Espectro de absorción del agua [2]

- Aplicaciones médicas: El alto coeficiente de absorción que presenta el agua en esta zona del espectro hace este tipo de láseres interesante para diversos procedimientos médicos (entre los que figura la litotricia, y diversos procesos en el área de urología). Además, este tipo de láseres resultan interesantes en procedimientos de ablación, pues con ellos puede conseguirse una incisión precisa con una pequeña zona circundante afectada térmicamente (menor a $0.5\ \text{mm}$) [3].
- Esta región del espectro puede, también, ser utilizada en gran variedad de aplicaciones dentro de campos como la espectroscopía, diagnóstico médica invasiva, comunicaciones ópticas por el espacio libre, y sensores remotos. Por último, cabe destacar también las aplicaciones militares, como contramedidas electromagnéticas, punteros de localización de objetivos para municiones inteligentes, o conversores de sistemas de comunicación que utilicen un número variado de longitudes de onda.

En esta región del espectro podemos encontrar actualmente sistemas de emisión láser de semiconductor basados en (AlGaIn)(AsSb), láseres de colorante basados en desplazamiento por Raman (Raman-shifted dye lasers), y láseres de fibra óptica dopada con holmio y tulio (tanto en matrices Tm-Ho:YAG, como por separado en forma de Tm:YAG u Ho:YAG).

Como en el presente trabajo nos centraremos en la fibra óptica dopada con tulio como medio amplificador para la emisión láser, es conveniente conocer las principales características espectroscópicas del ion Tm^{3+} en sílice.

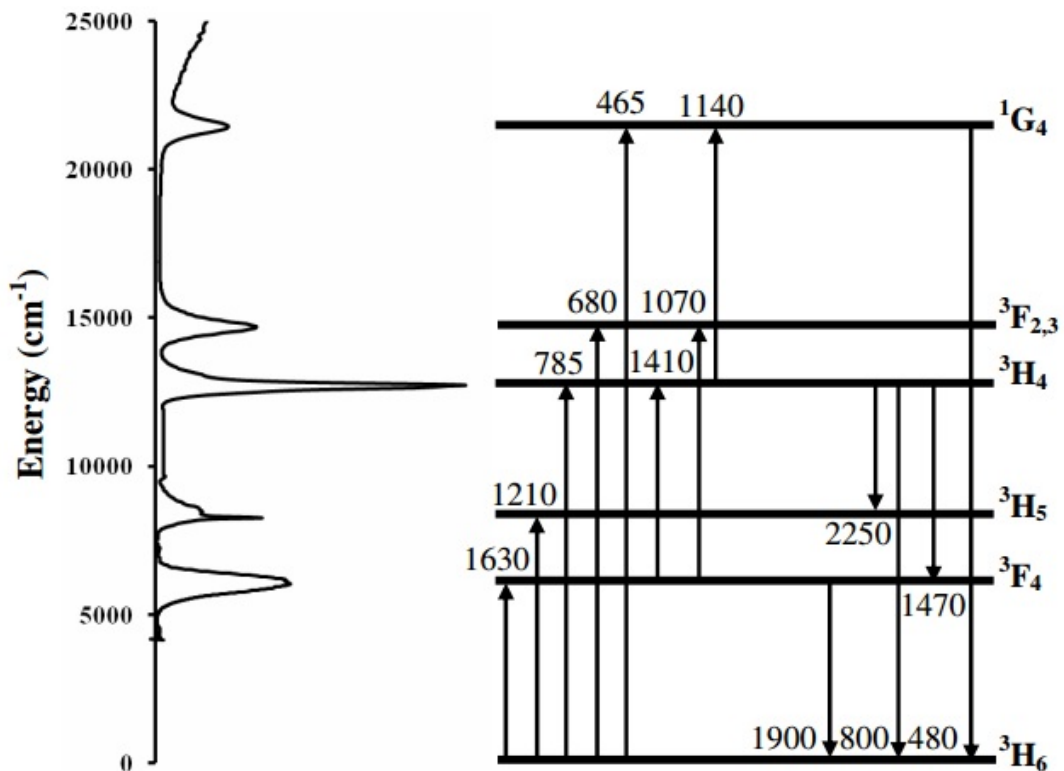


Figura 2: Bandas de energía del ion Tm^{3+} en sílice. Las transiciones ópticas de emisión y absorción están expresadas en nanómetros [4]

En la figura 2 se muestran las bandas de energía del ion Tm^{3+} en sílice. Aunque en la parte de la derecha se representan niveles de energía, en realidad se trata de bandas de energía producidas por el desdoblamiento Stark. Su anchura puede apreciarse en el espectro de absorción representado en la parte izquierda de la figura.

La transición láser se produce entre los niveles $3F_4$ y $3H_6$. Existen varios mecanismos para obtener una absorción eficiente en la fibra dopada:

- Esquema de casi tres niveles bombeando en torno a 800 nm, con láseres sintonizables del Ti:Zafiro, o láseres de diodo (comunes comercialmente). Se bombea a la banda $3H_4$, donde se da una desexcitación hasta la banda $3F_4$ que produce inversión de población entre los niveles de la transición láser. Como la desexcitación se debe a

un proceso de relajación cruzada, también se produce una excitación desde el nivel fundamental que ayuda a aumentar la inversión de población de la transición láser. Se bombea a la banda ${}^3\text{H}_4$, donde se da una transición hasta la banda ${}^3\text{F}_4$. Este proceso supone una mejora de la eficiencia cuántica del sistema, y por esta razón hay trabajos que reportan valores de la eficiencia superiores al 100% [5]. Ilustramos este fenómeno en la figura 3. A través de este procedimiento se logran láseres con eficiencia muy elevada, entre el 30% y el 40% [6][7][8], e incluso mayores, del 57% [9] y del 68% [10].

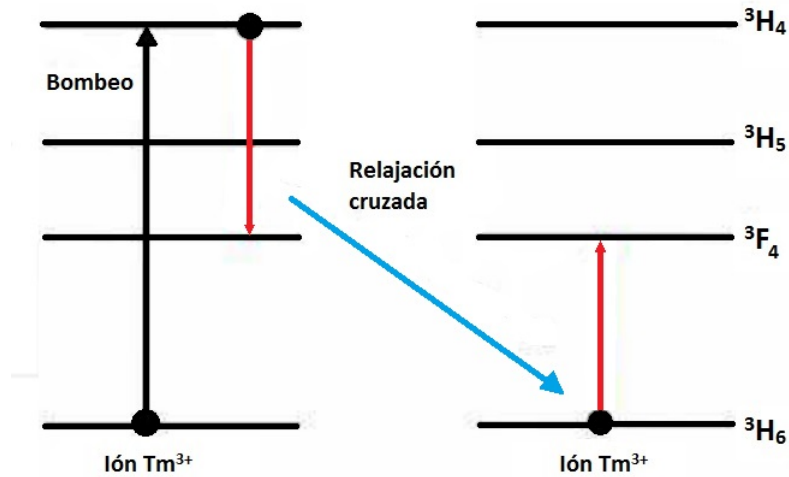


Figura 3: Excitación mediante relajación cruzada

- Esquema de dos bandas, bombeando en torno a 1630 nm, con amplificadores de erbio comerciales (EDFA), tal y como representamos en la figura 4. Éste es el esquema que adoptaremos en la realización del presente proyecto. Bombeando en la región de 1550-1600 nm, se han publicado eficiencias inferiores, del 11% [11] y del 25% [12].



Figura 4: Esquema de dos bandas en el que se basa nuestro trabajo

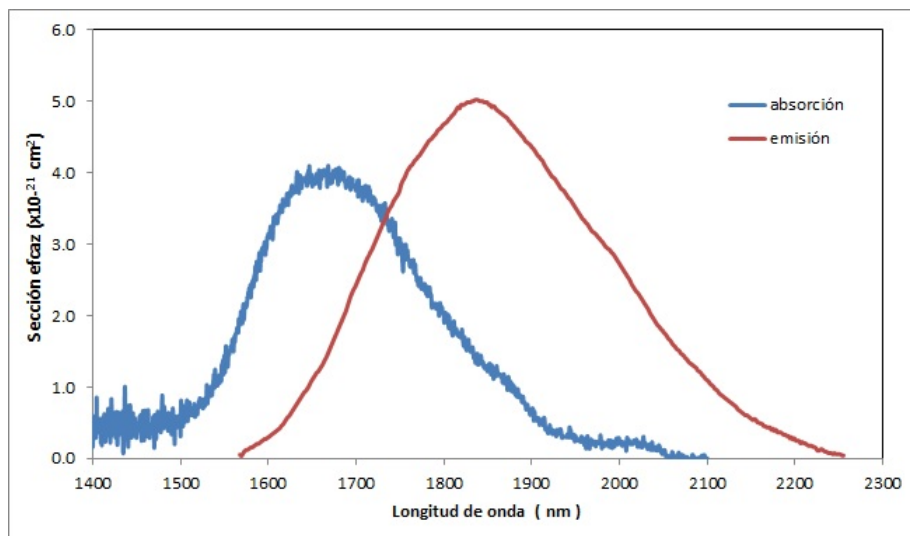


Figura 5: Secciones eficaces de absorción y emisión [13]

Las secciones eficaces de absorción y de emisión de la transición láser se ven representadas en la figura 5. En la figura observamos una diferencia de unos 200 nm entre las regiones espectrales de mayor absorción (en torno a 1650 nm) y emisión (en torno a 1840 nm). Esta gran separación espectral facilita enormemente la obtención de amplificación óptica y el establecimiento de la acción láser.

A partir de esta información es posible determinar que una zona interesante para el bombeo es alrededor de los 1600 nm, donde las regiones de absorción y emisión se solapan lo menos posible. Asimismo, también cabe esperar que la fibra amplifique más en longitudes de onda donde la absorción de bombeo sea más baja, es decir, en torno a los 1900 nm.

En suma, podemos constatar que la zona de 2 μm es un rango interesante del espectro, que ofrece aplicaciones en diversos campos de la ciencia y la tecnología. Ahora, con la introducción de láseres de fibra óptica dopada con tulio y bombeados con láseres de fibra óptica dopada con erbio, es posible la construcción de sistemas todo-fibra donde el alineado y las inestabilidades dejan de ser un problema.

2. Objetivos

Los objetivos que se plantean lograr en este trabajo son los siguientes:

- Construcción y caracterización de dos láseres de erbio (continuo y pulsado mode-locking) que constituirán la etapa de bombeo del posterior láser de fibra dopada con tulio.
- Construcción de un láser de fibra dopada con tulio. Se utilizarán, por separado, las etapas de bombeo mencionadas anteriormente. Se caracterizarán los espectros de emisión del láser, así como su rendimiento. Comparativa técnica entre ambos sistemas y sus propiedades.

- Caracterización de la instalación de fibra dopada como amplificador óptico. Se realizarán medidas de ganancia espectral de la instalación para bombeo continuo, extrayendo las conclusiones pertinentes.

3. Instalación experimental

Nuestra instalación experimental se puede dividir en dos etapas: la etapa de bombeo (constituida por un láser de fibra dopada con erbio, con su salida amplificada por un EDFA), y la cavidad de anillo del láser de tulio propiamente dicho. El láser de bombeo puede operar en modo continuo (CW) o en modo pulsado mediante encadenado de modos (mode-locking), dependiendo de los componentes que se coloquen dentro de la cavidad de anillo.

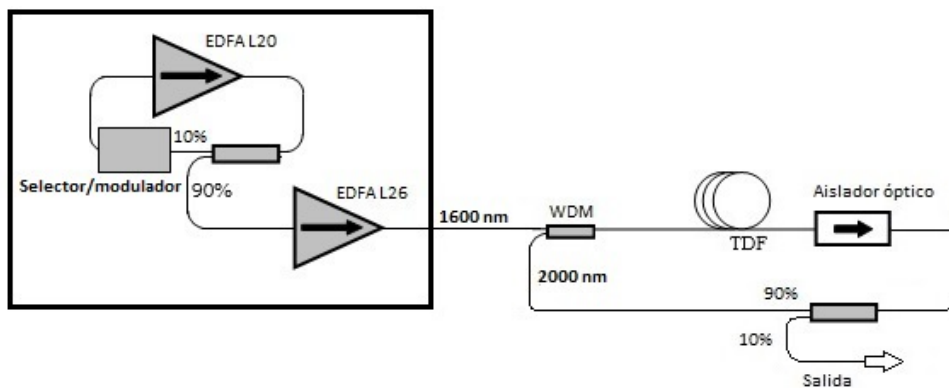


Figura 6: Esquema de la instalación experimental. Se bombea con un láser de fibra dopada con erbio, en CW o pulsado mediante mode-locking

Los sucesivos elementos se irán explicando a continuación.

3.1. Etapa de bombeo operando en modo continuo

El láser de bombeo operando en CW consta de varios elementos (figura 7):

- Amplificadores comerciales de fibra dopada con erbio (EDFA) operando en banda L: el medio activo del láser de bombeo es un amplificador con 20 dBm de potencia de salida de saturación (Keopsys, modelo KPS-BT2-L-20-PB-FA, en adelante EDFA-L20) y la potencia de salida del láser de anillo es amplificada por un segundo amplificador con 26 dBm de potencia de salida de saturación (Manlight, modelo HWT-EDFA-GM-SC-BO-L26, en adelante EDFA-L26).
- Selector de longitud de onda de emisión láser: circulador óptico y red de Bragg en fibra (FBG, fiber Bragg grating). Con la instalación del circulador conseguimos dos efectos: por un lado, la luz que proviene del acoplador se ve conducida hacia la red de Bragg (Technica), desde la que se refleja una zona del espectro muy estrecha (anchura de 0.25 nm a -3dB de pérdidas) centrada en 1611.64 nm. La luz reflejada

vuelve al circulador, siendo esta vez conducida de vuelta hacia el amplificador de erbio. Por otra parte, la presencia del circulador previene la amplificación de la emisión espontánea contrapropagante, evitando inestabilidades en la potencia láser emitida y aumentando la eficiencia de la cavidad.

- Acoplador de salida: Se trata de un acoplador 90/10, instalado de forma que extrae el 90% de la potencia hacia el láser de tulio, quedando el 10% restante en la cavidad del láser de erbio. Esta configuración ayuda a maximizar la potencia de salida, aumentando la potencia que entra posteriormente en el láser de fibra de tulio.

Instalamos el EDFA-L20 en el láser de erbio, y a su salida, conectamos el EDFA L26, tal como ilustra la figura 7. El propósito de esta disposición es generar una potencia láser moderada (alrededor de 12 dBm) en torno a 1612 nm, pero más estable, para posteriormente amplificarla utilizando el EDFA-L26.

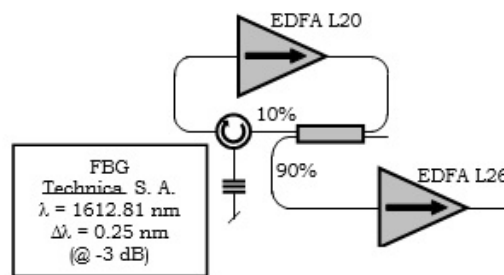


Figura 7: Esquema del láser de bombeo operando en CW

Como ambos EDFAs tienen dos etapas de amplificación, están bombeados con dos láseres de semiconductor, cuyas intensidades pueden ser reguladas para aumentar la potencia láser a la salida de esta etapa. Existen dos parámetros importantes en la optimización de la potencia de salida: se trata de las intensidades de alimentación de los diodos de bombeo de la segunda etapa de cada uno de los EDFA disponibles. En adelante, utilizaremos el subíndice 1 para referirnos al EDFA-L20, y el subíndice 2 para el EDFA-L26.

La potencia de salida crece con las intensidades de alimentación de cada EDFA según podemos observar en la figura 8. Observamos que, para diferentes intensidades en el EDFA-L26 (es decir, para diferentes I_2), la potencia de salida crece claramente hasta $I_1=800$ mA. A partir de este punto, la potencia de salida tiende a saturar, por lo que el crecimiento es mucho más moderado.

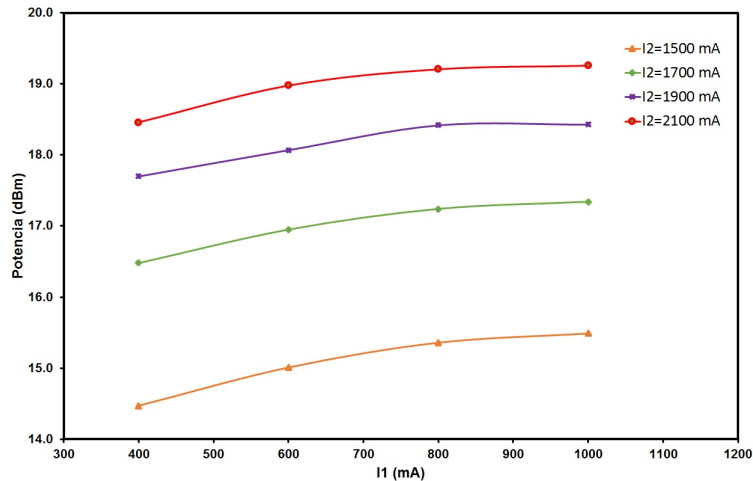


Figura 8: Evolución de la potencia de salida con las intensidades de alimentación de los diodos de bombeo de ambos EDFAs

En cuanto al espectro de emisión del láser construido, se recogen algunos espectros de ejemplo en las figuras 9 y 10, medidos con una resolución de 0.06 nm. En la figura 9 podemos observar un espectro típico de emisión del láser de erbio. Los niveles de fluorescencia son del todo despreciables comparados con la potencia láser, la cual está centrada en 1612 nm, como cabía esperar.

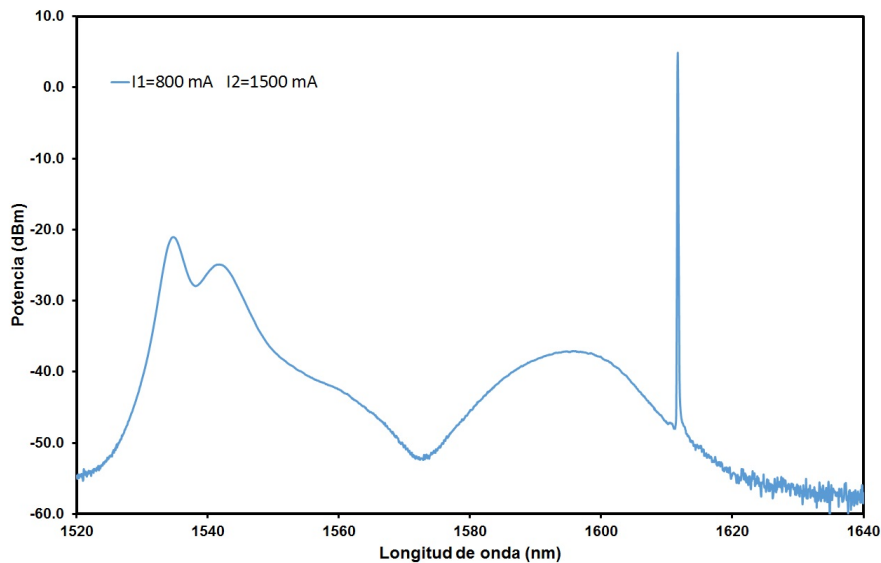


Figura 9: Espectro típico del láser de bombeo operando en CW

En la Figura 10 aumentamos la potencia del amplificador de salida (es decir, I_2), para comprobar el efecto del segundo amplificador sobre la potencia de salida. Observamos que amplifica el pico de emisión láser, si bien también amplifica débilmente la potencia de fluorescencia. Esta potencia de fluorescencia no nos afecta a la hora de bombear la cavidad del tulio, ya que también se aprovechará para bombear los iones de tulio. La longitud de

onda del láser no ha cambiado y su potencia ha aumentado de forma acorde al aumento de I_2 .

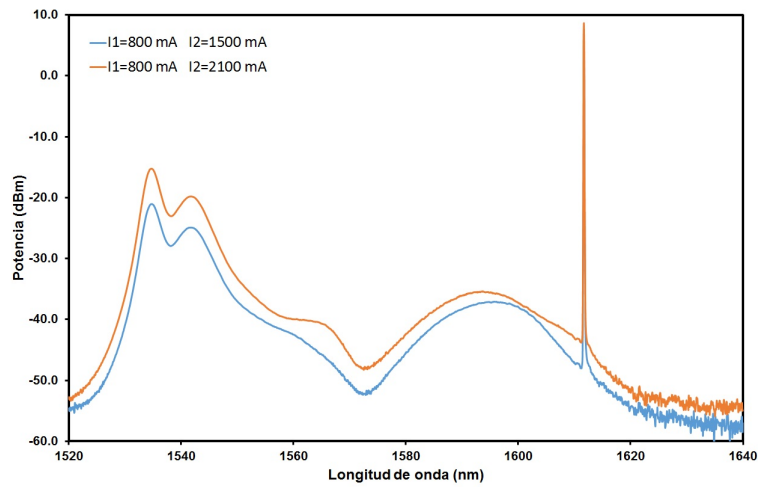


Figura 10: Comparación de espectros para diferentes intensidades de bombeo del segundo amplificador

3.2. Etapa de bombeo pulsado mediante mode locking

La cavidad que utilizaremos para generar emisión pulsada por encadenado de modos consta de elementos diferentes a la cavidad CW, tal y como podemos observar a través de la figura 11.

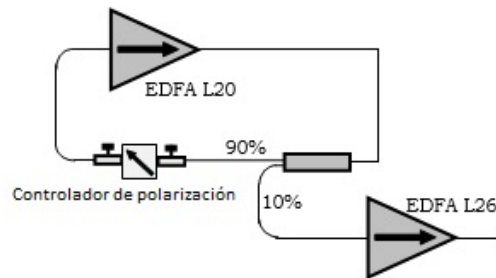


Figura 11: Esquema de la instalación para la etapa de bombeo pulsado mediante mode locking

Los cambios en esta etapa de bombeo son los siguientes:

- Se sustituye el selector de longitud de onda por el modulador para conseguir encadenar los modos longitudinales. El modulador está formado por un polarizador lineal (Thorlabs, modelo ILP1550SM) entre dos controladores de polarización (General Photonics, modelo Polarite). Nuestros controladores inducen birrefringencia en la fibra por medio de compresiones mecánicas sobre la misma. De esta manera, actúan como una lámina desfasadora donde el ángulo y el desfase se pueden modificar independientemente, permitiendo la modificación del estado de polarización a la

salida. Si bien con un sólo controlador se podría establecer el régimen pulsado (cuyo funcionamiento comentaremos más adelante), experimentalmente comprobamos que el sistema es mucho más estable si utilizamos dos controladores de polarización en vez de uno, tal como muestra el esquema de la instalación.

El modulador introducido en la cavidad para conseguir el encadenamiento de modos está basado en el efecto de rotación no lineal de la polarización (NPR, nonlinear rotation polarization), el cual es un fenómeno no lineal que induce una rotación del estado de polarización proporcional a la intensidad de luz y a la longitud del material. En láseres de fibra óptica con cavidad de anillo es una técnica pasiva ampliamente utilizada para conseguir encadenado de modos [14][15], ya que las cavidades son muy largas y en las que resulta fácil minimizar las pérdidas, consiguiendo aumentar por tanto la potencia confinada y la magnitud de los efectos no lineales. Ajustando los controladores de polarización se consigue que, inicialmente, tras recorrer la cavidad, el estado de polarización que llega al polarizador lineal sea aproximadamente ortogonal a su dirección de polarización (condición de modulador cerrado). Ahora bien, cuando la potencia es suficientemente elevada (pulsos), el efecto NPR consigue que la potencia llegue al polarizador lineal con un estado de polarización paralelo a su dirección de polarización (condición de modulador abierto) y el láser emite un pulso. Una parte de la potencia del pulso se queda confinada en la cavidad y, tras dar una vuelta a la cavidad, es amplificada y nuevamente se encuentra con el modulador abierto y se vuelve a emitir otro pulso. La iteración de este proceso origina el tren de pulsos emitido por el láser de encadenado de modos.

- Acoplador de salida: Se trata de un acoplador 90/10, análogo al utilizado en la etapa CW, pero ahora se mantiene un 90% de la potencia dentro de la cavidad. El motivo es que se necesita mantener una potencia lo mayor posible dentro de la cavidad para facilitar el correcto funcionamiento del modulador, el cual está basado en un efecto no lineal.

En la figura 12 se muestra el espectro (resolución de 1 nm) de salida del láser pulsado. Está centrado en 1605 nm. Como era de esperar, es un espectro bastante ancho (anchura superior a la decena de nanómetros) ya que la anchura espectral y la duración del pulso son variables conjugadas (un pulso corto lleva asociado un espectro ancho). De hecho, los pulsos obtenidos tienen una duración de 0.3 ps, aproximadamente. Esta medida se realizó mediante la técnica interferométrica de autocorrelación de segundo orden, empleando un interferómetro de Mach-Zehnder como autocorrelador y doblando en frecuencia con un cristal no lineal de BBO.

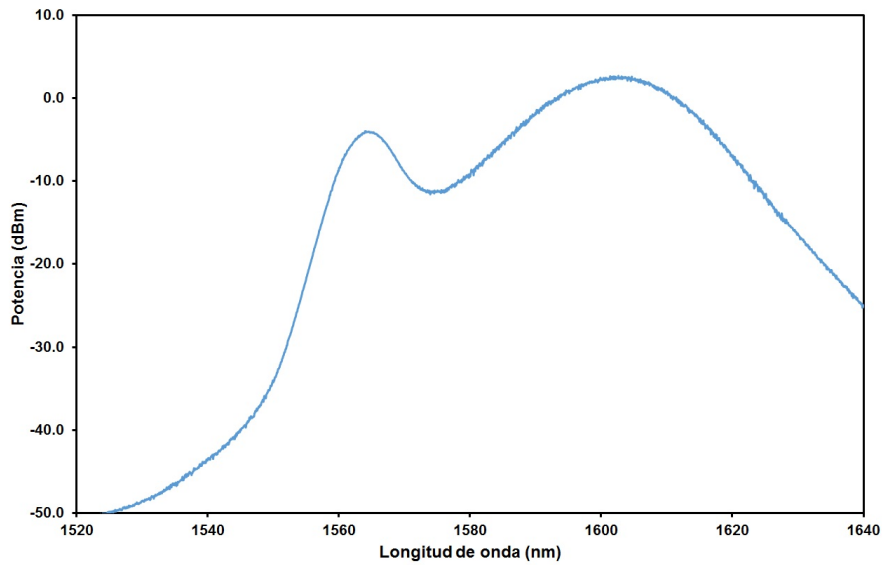


Figura 12: Espectro típico del láser de bombeo mode-locking (resolución 1 nm)

En la figura 13 se aprecia el tren de pulsos obtenido, con una frecuencia de 3.27 MHz, lo que equivale a que la longitud de la cavidad es aproximadamente de 63 m de fibra óptica. La duración de los pulsos no puede estimarse con esta figura ya que la anchura que aparece corresponde a la respuesta temporal del detector empleado, demasiado lento en comparación con la duración de cada pulso.

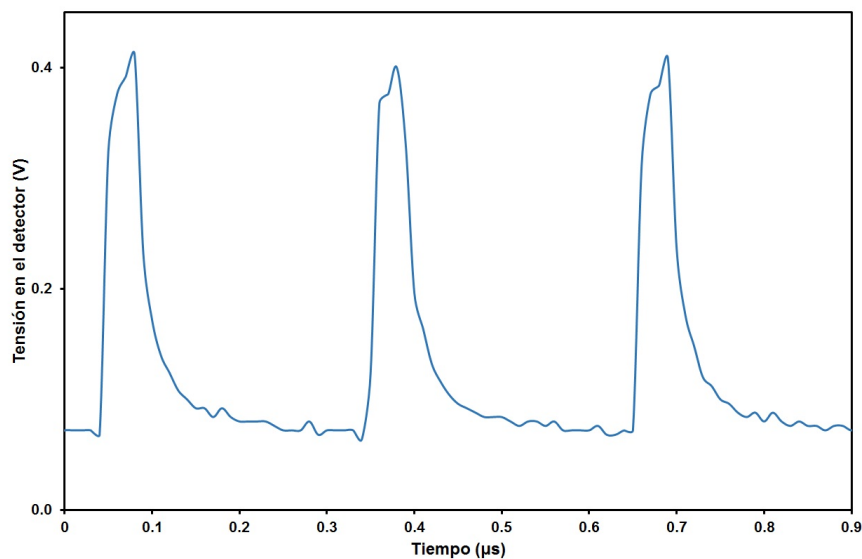


Figura 13: Tren de pulsos del láser pulsado mediante encadenado de modos

3.3. Láser de fibra dopada con tulio: cavidad

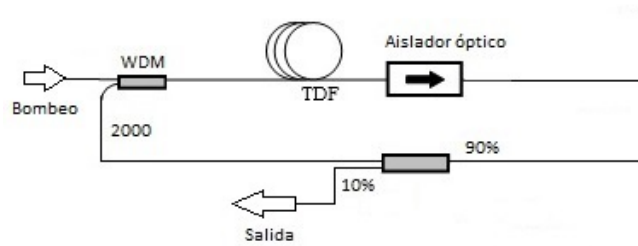


Figura 14: Esquema de la instalación de la cavidad del láser de fibra dopada con tulio

Tal como se ilustra en la figura 14, la cavidad desarrollada para el láser de fibra dopada con tulio consta de los siguientes elementos:

- Acoplador WDM 1600/2000: Está diseñado para acoplar en una misma fibra óptica el espectro inferior a 1800 nm que procede de una de sus entradas y el espectro superior a 1800 nm que procede de la otra de sus entradas. Por tanto, se optimiza la transmisión a la cavidad tanto de la potencia de bombeo (1600 nm) como de la potencia de señal amplificada (2000 nm).
- Aislador óptico: Impide la recirculación en la cavidad de la potencia de fluorescencia contrapropagante para evitar inestabilidades (igual que el circulador en el anillo de bombeo CW).
- Fibra óptica dopada con tulio (modelo SM-TSF-9/125 de Nufern): Se trata del medio activo que producirá la emisión estimulada de radiación y la amplificación. Variaremos su longitud a lo largo de las diferentes medidas para observar los cambios en la intensidad y espectro de salida.
- Acoplador 90/10: Se trata del acoplador de salida de la instalación.

3.3.1. Calibrado del acoplador WDM 1600/2000

Empleando una fuente de supercontinuo disponible en el laboratorio se midió la transmisión del acoplador WDM de la cavidad del láser de fibra óptica con tulio desde 1400 nm hasta 2000 nm para cada una de sus dos entradas. Como se aprecia en la figura 15, podemos acoplar tanto la potencia de bombeo (1600 nm) como la potencia emitida por el tulio (1900-2000 nm) dentro de la cavidad con pérdidas de potencia muy bajas.

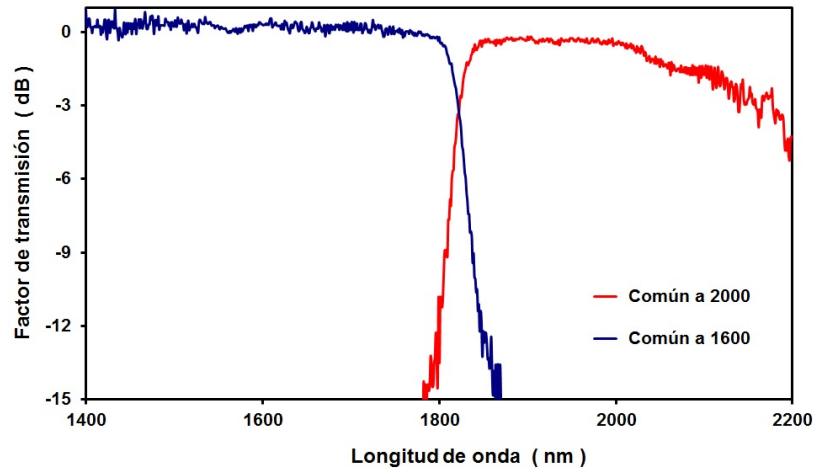


Figura 15: Transmisión espectral del acoplador WDM 1600/2000

3.3.2. Calibrado del aislador óptico

De forma análoga al acoplador WDM se midió la transmisión espectral del aislador óptico incluido en la cavidad (figura 16). Observamos que presenta una transmisión aceptable en la región 1800-2000 nm. La transmisión en el sentido opuesto no supera el 1% (límite de sensibilidad de la instalación de medida; además, fabricante estima las pérdidas de transmisión en el sentido opuesto en 35 dB) en la misma región espectral, luego el funcionamiento de este componente es correcto para en nuestro sistema.

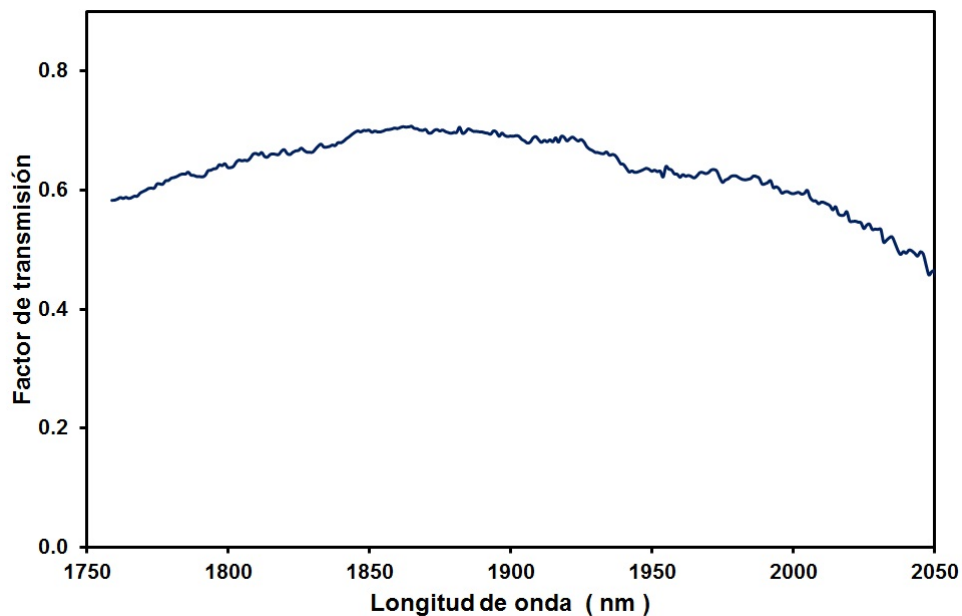


Figura 16: Transmisión espectral del aislador óptico

4. Resultados

En esta sección analizaremos los resultados obtenidos con el láser de fibra dopada con tulio para los dos láseres de bombeo empleados a partir de las medidas de la recta característica y de los espectros de salida. Por último, se expondrán medidas de ganancia espectral de la fibra óptica dopada con tulio.

Todas las medidas han sido obtenidas mediante la técnica de amplificación síncrona en una instalación formada por un monocromador con una red de difracción (Jobin Yvon - Horiba) de 300 líneas/mm cuya eficiencia es máxima es 2000 nm (resolución espectral de 4 nm) y un detector de PbS cuya respuesta se extiende desde 1000 nm hasta 2900 nm, siendo máxima en el rango desde 1800 nm hasta 2400 nm.

Asimismo, mantendremos la intensidad de alimentación del EDFA L20 en 1000 mA (el máximo que nos permite la instalación) e iremos variando la intensidad de alimentación del EDFA L26. La potencia de la etapa de bombeo conjunta viene descrita por la magnitud P_p , mientras que la potencia de salida del láser de Tm se denotará como P_s , expresadas ambas en mW.

4.1. Láser de bombeo operando en CW

En esta sección expondremos los resultados obtenidos utilizando la configuración de bombeo operando en continuo (CW). Las medidas han sido realizadas utilizando una longitud de fibra dopada de 1.80 m.

4.1.1. Espectros de salida

A continuación mostramos los espectros obtenidos para diferentes potencias de bombeo P_p (Figura 17) superiores a la potencia de bombeo umbral (137 mW), normalizados a altura unidad para una mejor visualización y comparativa.

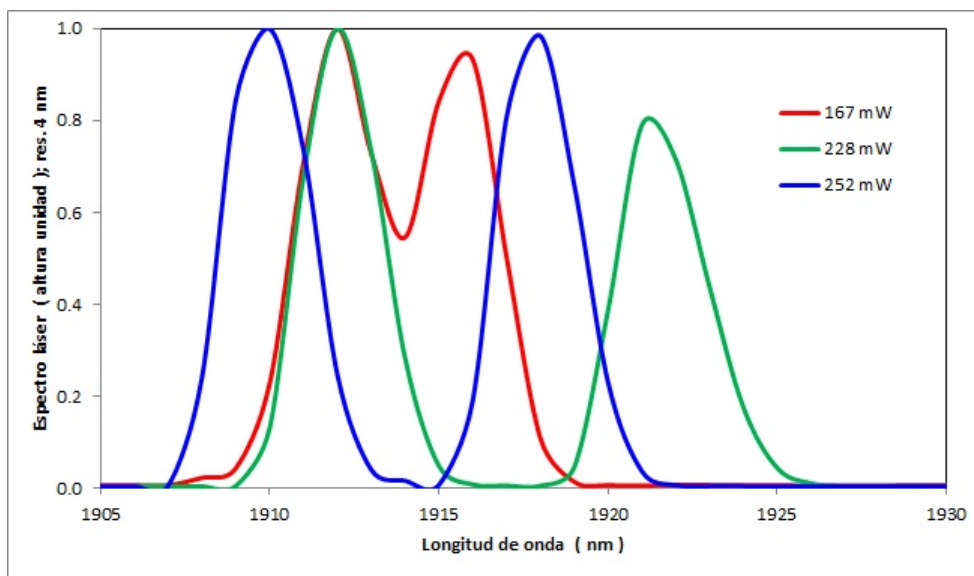


Figura 17: Espectros de salida normalizados a altura unidad (bombeo CW)

Los espectros obtenidos muestran dos picos de emisión láser; este fenómeno se produce debido a una competencia entre modos dentro de la cavidad, resultando en una disminución del rendimiento si atendemos a una única longitud de onda. Podemos también notar que la longitud de onda de emisión láser no se mantiene constante con la potencia de bombeo, sino que sufre fluctuaciones de algunos nanómetros.

Al aumentar la potencia de bombeo, apreciamos que este fenómeno cobra fuerza, diferenciando completamente las dos longitudes de onda de emisión. No obstante, es un fenómeno de compensación de pérdidas intrínsecamente ligado al perfil de ganancia de nuestra instalación, que comentaremos con un poco más de profundidad en la sección 4.4. Este efecto podría corregirse con un filtro de longitudes de onda en la zona espectral deseada, obteniendo un pico de emisión menos potente, pero centrado.

En este conjunto de espectros, observamos que la longitud de onda de emisión promedio de cada máximo de emisión se sitúa entre 1900 y 1925 nm.

En la figura 18 podemos apreciar claramente el fenómeno de desplazamiento de las longitudes de onda de emisión; mientras que uno de los máximos de emisión se desplaza notablemente en longitud de onda, el otro se mantiene estable (en torno a 1912 nm) para un rango amplio de potencias de bombeo (dentro de lo que nos permite nuestra instalación).

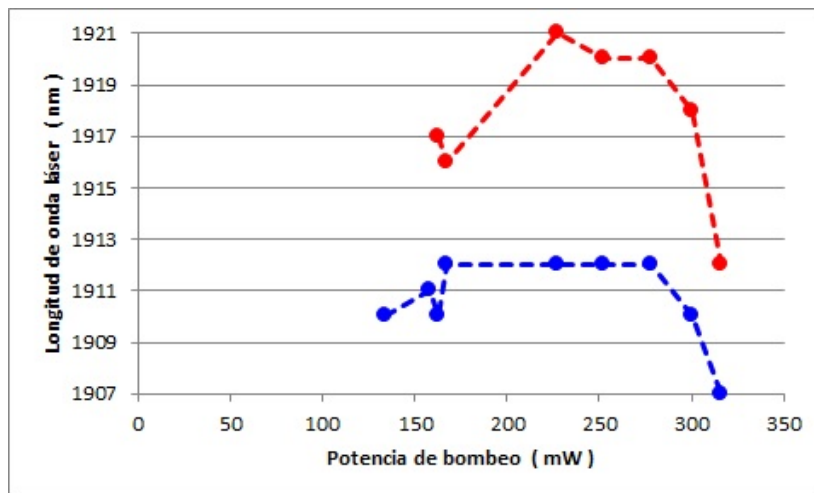


Figura 18: Desplazamiento de las longitudes de onda de emisión láser (bombeo CW)

4.1.2. Recta característica

En la figura 19 se representa la potencia láser emitida en función de la potencia de bombeo empleada (recta característica). Para obtener la potencia láser emitida hemos integrado los espectros obtenidos para cada una de las potencias de bombeo. Si bien en este tipo de ajustes es habitual mantener fija la longitud de onda para caracterizar el rendimiento espectral, hemos preferido integrar totalmente la potencia para analizar el rendimiento global de la instalación.

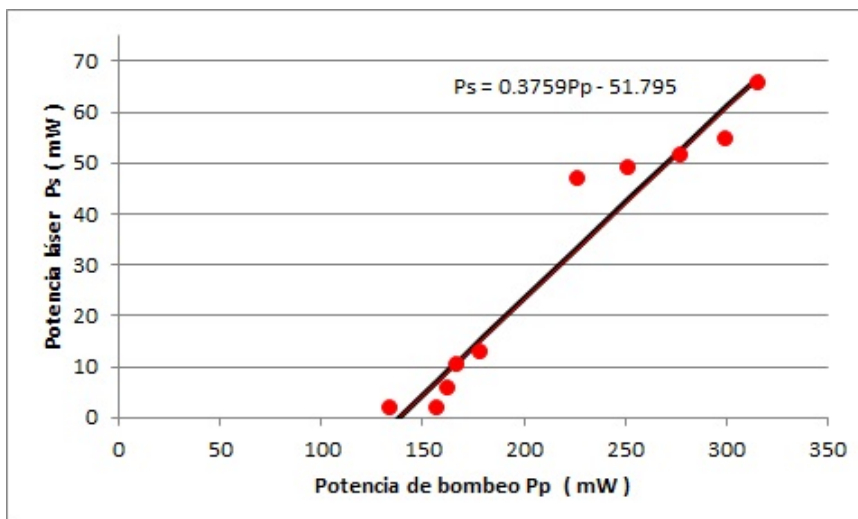


Figura 19: Recta característica del láser con bombeo en CW

En la figura 19 podemos observar un rendimiento aproximadamente estable para potencias de bombeo bajas y altas (respecto a nuestra instalación experimental), acompañadas de una zona (entre 230-250 mW de P_p), donde el sistema parece comportarse de forma ligeramente inestable; dicha inestabilidad se produce debido a la competencia de modos en la cavidad ya mencionada anteriormente. A partir de los resultados del ajuste lineal, obtenemos que la potencia de bombeo umbral es 138 mW y la eficiencia del láser es del 38%

4.1.3. Influencia de la relación de acoplo

Por último, en la configuración de bombeo CW hemos cambiado la relación de acoplo a la salida del láser de T_m para realizar una comparativa tanto de espectros como de eficiencia; ahora mantendremos el 10% de la potencia confinada dentro en la cavidad, y extraeremos el restante 90% a la salida de la instalación. En la figura 20 podemos observar los espectros obtenidos para diferentes potencias de bombeo, normalizados a altura unidad.

En estos espectros podemos apreciar que el máximo de emisión láser está centrado en torno a 1851 nm. Por tanto, debido al cambio de la relación de acoplo, la longitud de onda se ha desplazado entre 60 y 70 nm, hacia una longitud de onda más corta. Al confinar sólo un 10%, la cavidad presenta pérdidas más elevadas y la fibra dopada debe proporcionar una ganancia más alta para compensarlas. Por ello, la longitud de onda de emisión se desplaza hacia 1850 nm, región espectral zona de mayor ganancia, tal y como apreciaremos en la sección 4.4.

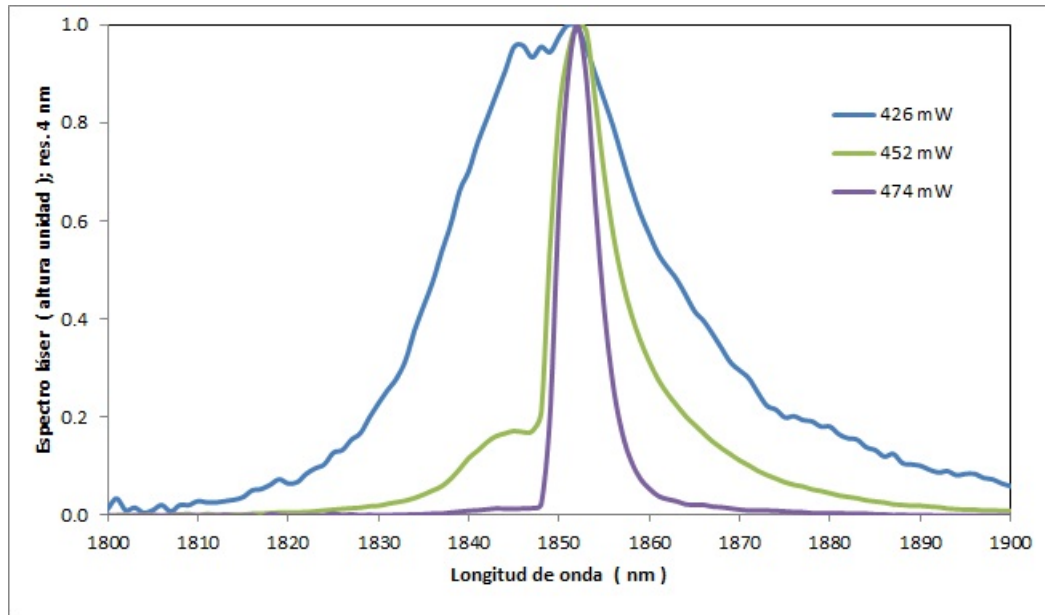


Figura 20: Espectros de la potencia láser para diferentes potencias de bombeo en CW cuando se acopla un 10% de la potencia en la cavidad en vez de un 90%

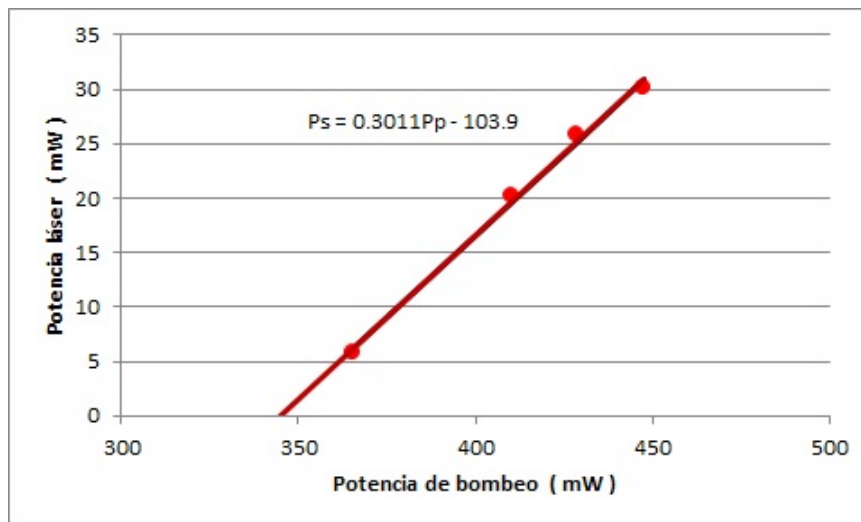


Figura 21: Recta característica con bombeo en CW cuando se acopla un 10% de la potencia en la cavidad en vez de un 90%

La recta característica para esta configuración se muestra en la figura 21. Los resultados nos muestran un aumento de la potencia de bombeo umbral, que ahora se sitúa en 345 mW; tal y como cabría esperar, es necesario una mayor potencia de bombeo cuando extraemos un 90% de la luz oscilante de la cavidad en vez de un 10%. Con la nueva relación de acoplo la eficiencia ha disminuido hasta el 30%. En la figura 20 podemos notar que la estabilidad de emisión en longitud de onda nos otorga un ajuste a recta mucho más preciso y fiable, debido a que se ha reducido notablemente con el bombeo el efecto de competencia de modos en la cavidad.

4.2. Láser con bombeo pulsado mediante mode-locking

En esta sección describiremos los resultados obtenidos con el segundo método de bombeo, basado en encadenado de modos. Los resultados expuestos se han medido utilizando una longitud de fibra óptica dopada con tulio de 1.80 m.

4.2.1. Espectros de salida

En la figura 22 podemos observar las medidas de espectro láser, normalizadas a altura unidad para una mejor comparativa de resultados. Observamos que, para bombeos cercanos al umbral (que ronda los 99 mW para esta configuración), tan solo tenemos un único máximo de emisión; sin embargo, rápidamente entra en juego el efecto de competencia entre modos de oscilación en la cavidad, dividiendo el espectro de salida en dos máximos bien diferenciados.

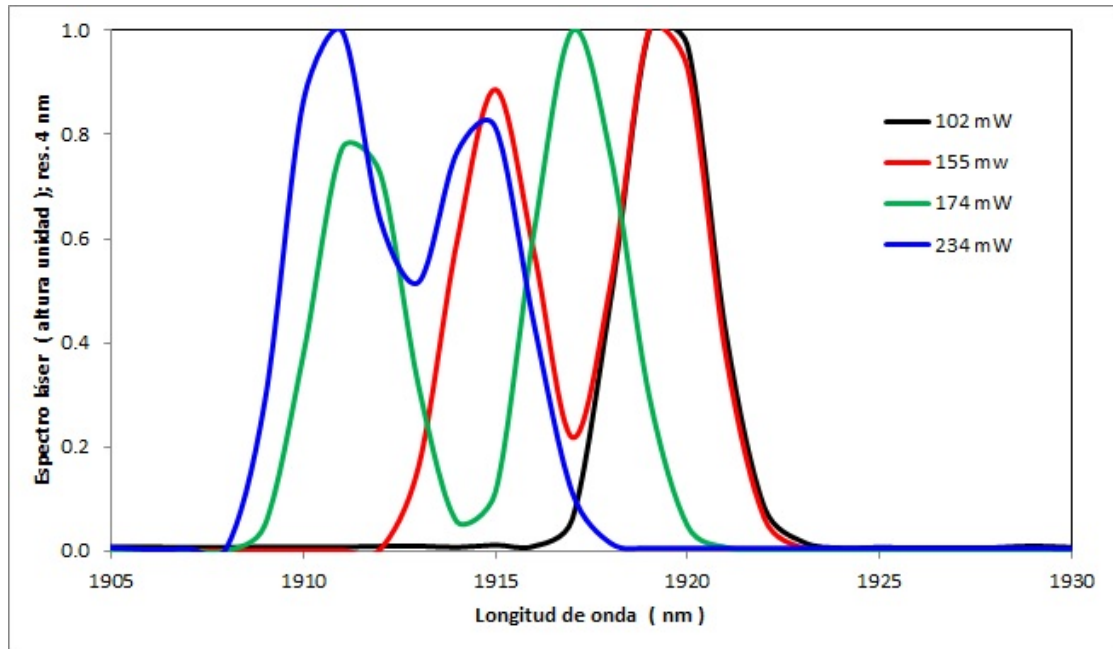


Figura 22: Espectros láser normalizados a altura unidad (bombeo pulsado mediante mode-locking)

A medida que aumentamos la potencia de bombeo, se observan además otros dos fenómenos: por un lado, el desplazamiento de la longitud de onda de emisión hacia regiones donde el perfil de ganancia es mayor, aumentando la amplificación. Por otro, es posible apreciar una diferenciación de los máximos de emisión láser conforme aumentamos el bombeo; mas los máximos tienden a acercarse cuando el bombeo excede los 200 mW, sin llegar a juntarse. Podría lograrse un espectro con un único máximo de emisión con la colocación de un filtro en la deseada longitud de onda, esto es, modificando el perfil de pérdidas de la instalación para que sólo existiera ganancia neta en una región del espectro, y no en dos.

En la figura 23 podemos observar, a partir de un cierto bombeo (que ronda los 145

mW), el fenómeno de diferenciación de máximos de emisión láser. Notamos también que, con la entrada de este efecto en juego, ambos máximos de emisión se desplazan entre 4 y 5 nm hacia longitudes de onda más cortas.

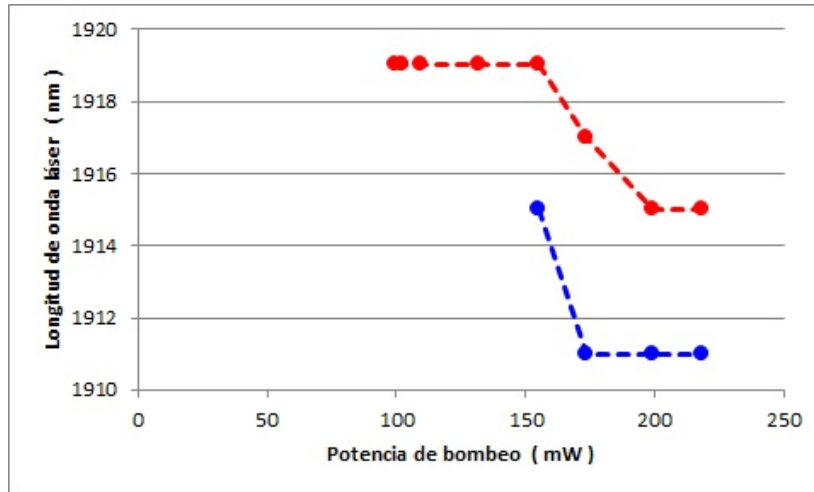


Figura 23: Desplazamiento de las longitudes de onda de emisión (bombeo pulsado mediante mode-locking)

4.2.2. Recta característica

De la misma forma que en el apartado de bombeo operando en CW, medimos la recta característica determinando la potencia emitida mediante la integración numérica de los espectros obtenidos, lo que nos permite ofrecer una estimación de la eficiencia del láser de fibra dopada con tulio con el bombeo pulsado mediante mode-locking.

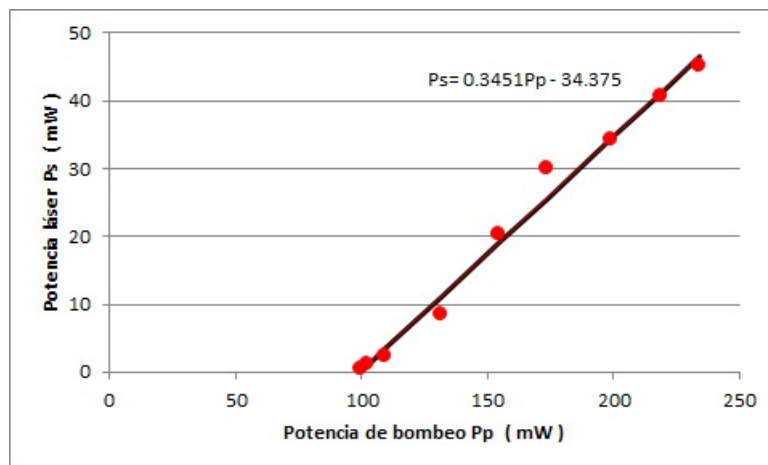


Figura 24: Recta característica del láser empleando bombeo pulsado

Del ajuste a línea recta, se obtiene que la eficiencia es del 35% y la potencia de bombeo umbral es 100 mW. El ajuste a recta es sólido salvo por un punto en torno a $P_p=165$ mW, que se desvía mínimamente debido a fluctuaciones del sistema en esta región de bombeo.

4.3. Comparativa CW/mode-locking

A la hora de realizar una comparación entre los resultados obtenidos con cada configuración de bombeo, podemos fijarnos en diferentes aspectos:

- **Potencia:** Las potencias espectrales registradas son de una magnitud muy similar. Este efecto es debido a que, en el caso de bombeo pulsado, el periodo del tren de pulsos es mucho más rápido que el tiempo de vida media cuando llega el siguiente pulso, por lo que tenemos una situación donde la fuente de bombeo, pese a ser pulsada, produce un bombeo “casi continuo”.
- **Competencia de modos:** Tanto en configuración CW como en mode-locking observamos la aparición de dos máximos de emisión láser, resultado de la compensación de las pérdidas de la instalación en dos longitudes de onda del perfil de ganancia. Para ambos bombeos y con la misma relación de acoplo, la emisión láser se produce en la misma región espectral, entre 1910 nm y 1920 nm.
- **Desplazamiento de la longitud de onda de emisión:** En ambas configuraciones de la instalación observamos un desplazamiento de la longitud de onda de emisión láser para los máximos presentes. Sin embargo, la magnitud de este desplazamiento es diferente para bombeo CW (desplazamiento promedio de 10 nm) que para bombeo mode-locking (desplazamiento promedio de 5 nm). La diferencia de magnitud entre los desplazamientos nos advierte, además, sobre la estabilidad del sistema, que resulta ser mayor con bombeo mode-locking que con bombeo CW.
- **Eficiencia y bombeo umbral:** Para bombeo CW obtenemos una potencia de 65 mW con una eficiencia del 38% y un bombeo umbral de 138 mW, mientras que para bombeo mode-locking obtenemos una potencia de 45 mW con una eficiencia del 35% y un bombeo umbral de 100 mW. Aunque ambas eficiencias son cercanas entre sí, obtenemos un mejor rendimiento bombeando en CW.

En la bibliografía hay gran variedad de montajes experimentales, pero se recogen eficiencias similares a las que hemos obtenido. Bombeando en la región de 1550-1600 nm, se han publicado eficiencias inferiores, del 11% [16] y del 25% [12]. Sin embargo, bombeando en la región de 790-808 nm, se han publicado eficiencias similares: 32% [6], 35% [7] y 39% [8]; también eficiencias superiores: 57% [9] y 68% [10]. Comercialmente, se ha encontrado un láser comercializado por Thorlabs con una emisión máxima de 35 mW, inferior a la que hemos conseguido con nuestros montajes.

- **Estabilidad del sistema:** La configuración de bombeo mode-locking ha mostrado una estabilidad mayor que la configuración CW, tanto en potencia emitida como en longitud de onda de emisión, donde el promedio de desplazamiento ha sido menor (5 nm en el caso de bombeo mode-locking, frente a 10 en el caso de bombeo CW). No obstante en ambas configuraciones de bombeo se ha podido apreciar este fenómeno, que declaramos ligado principalmente a los perfiles de ganancia de la fibra y pérdidas de la instalación, sin influencia apreciable de la etapa de bombeo.

4.4. Medidas de ganancia espectral

En esta sección describiremos los resultados obtenidos para las medidas de ganancia de nuestra instalación experimental. Éstos incluyen tanto la ganancia espectral del segmento de fibra dopada utilizado, como la ganancia espectral de la instalación completa (entendida como un amplificador óptico en su conjunto). Se ha utilizado una longitud de fibra óptica dopada de 1.36 m; si bien podemos apreciar que es un segmento de menor longitud que el utilizado posteriormente en las medidas de emisión láser, consideramos adecuada una reducción en la longitud de la fibra dopada para una mejor observación del espectro de ganancia.

Bombeo y señal de entrada se acoplan en la fibra de tulio con el acoplador WDM 1600/2000. A la salida se dispone un aislador para evitar efectos de auto-oscilación. En la figura 26 recopilamos las medidas de transmisión de los diferentes elementos empleados para construir el amplificador, así como el factor de transmisión de ambas en su conjunto. Observamos un buen factor de transmisión en la zona de 1825-1950 nm.

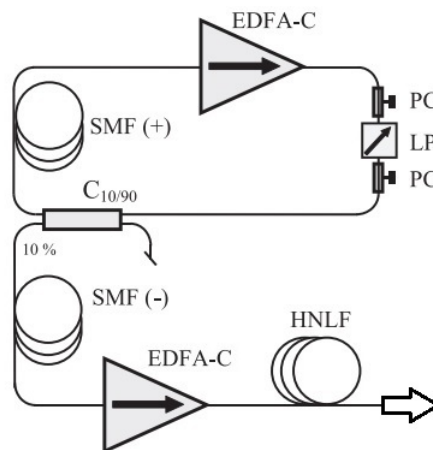


Figura 25: Esquema de la instalación del láser supercontinuo. PC controlador de polarización, LP polarizador lineal, HNLF fibra altamente no lineal

El láser supercontinuo consta de un láser de fibra dopada con erbio (EDFA operando en banda C) pulsado mediante encadenado de modos (utilizando el mismo método que el expuesto en la sección 3.2), al que se le han añadido dos segmentos de fibra óptica con dispersión positiva (SMF(+)) y negativa (SMF(-)) para compensar la dispersión del pulso. El tren de pulsos se amplifica con un segundo EDFA (operando en banda C) y se acopla posteriormente a un segmento de fibra altamente no lineal, que es la responsable de la aparición de efectos que aportan nuevas frecuencias al espectro de emisión (Raman, suma de frecuencias, four-wave mixing, etc).

En la figura 26 recopilamos las medidas de transmisión de los diferentes elementos de nuestra instalación, así como el factor de transmisión de la cavidad en su conjunto. Observamos un buen factor de transmisión en la cavidad en la zona de 1850-1930 nm.

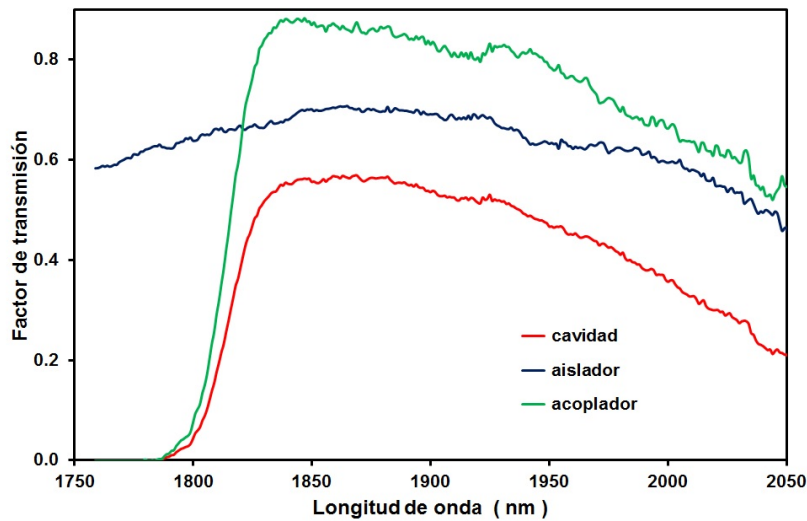


Figura 26: Factores de transmisión del WDM y del aislador y el producto de ambos

El factor de transmisión espectral de una muestra de fibra dopada viene descrita en la figura 27. En ella podemos observar que el máximo en este factor se sitúa entre la banda espectral de 1800-2000 nm, tal y como necesitamos para obtener una mayor amplificación óptica en esta zona. Se aprecia claramente la absorción entre las bandas de energía 3H_6 y 3H_5 (en torno a 1210 nm) y entre las bandas 3H_6 y 3F_4 (en torno a 1650 nm) del ión Tm^{3+} .

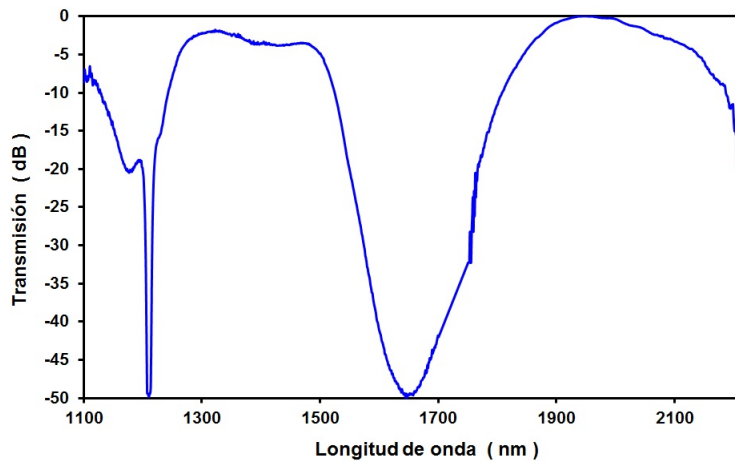


Figura 27: Factor de transmisión espectral de una muestra de 2 m de fibra dopada con tulio

En la figura 28 se reúnen los resultados de ganancia espectral para el segmento de fibra dopada utilizado. El bombeo umbral es 87 mW y, para máximo bombeo, la ganancia es máxima en 1850 nm, alcanzado los 12.7 dB. Podemos observar que el máximo factor de ganancia se logra en la zona de 1825-1875 nm, para las diferentes potencias de bombeo utilizadas. En la zona 1900-1930 nm notamos que el factor de ganancia ha disminuido respecto al máximo, siendo esta reducción más acusada para potencias de bombeo más

altas. Conforme aumenta la potencia de bombeo, la región de mayor amplificación se desplaza hacia longitudes de onda más cortas, lo que explica el desplazamiento de la longitud de onda del láser de fibra dopada con tulio al cambiar el factor de acoplo de salida.

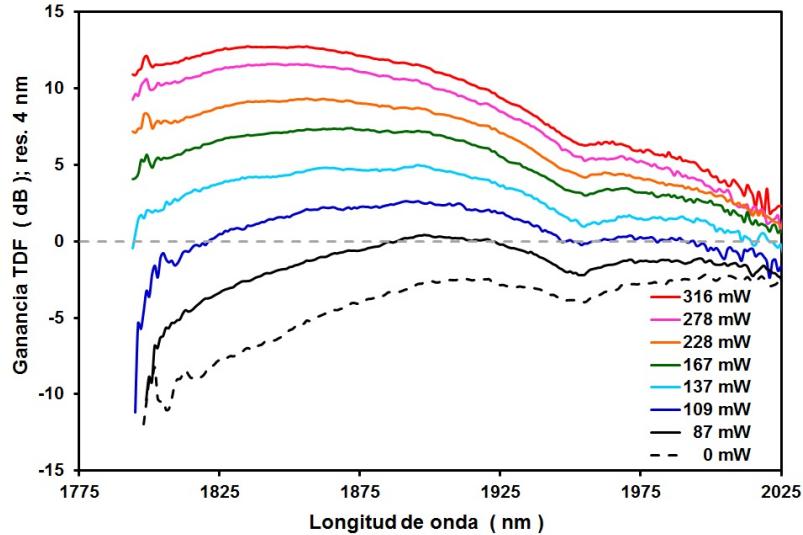


Figura 28: Ganancia espectral de 1.36 m de fibra dopada con tulio

Por último, en la figura 29 se recogen los resultados de las medidas de ganancia para el amplificador completo. Observamos una caída del factor de ganancia de unos 4 dB en la zona 1900-1930 para las potencias de bombeo registradas, causada por las pérdidas que presentan los restantes elementos de la instalación. El bombeo umbral es 109 mW y con el bombeo máximo del que disponemos (316 mW) se consigue amplificación en una región espectral que se extiende desde 1805 nm hasta 2000 nm (máximo de 10 dB en torno a 1850 nm). Por tanto, se obtiene una fuente con una potencia superior a la de supercontinuo en una región bastante ancha (200 nm, aproximadamente).

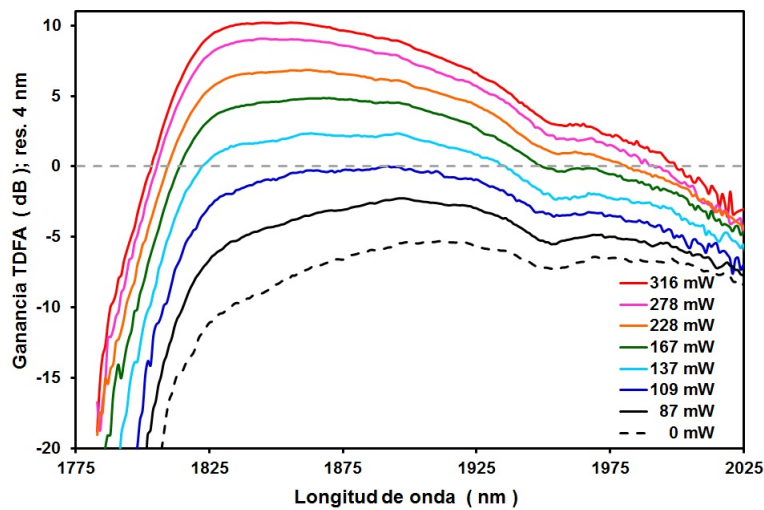


Figura 29: Ganancia espectral del amplificador de fibra dopada con tulio

En la bibliografía [16][17], se encuentran amplificadores con una anchura espectral de 240 nm y una ganancia de 36 dB para señal débil y de 20 dB para potencias de señal de 0 dBm. La empresa Picoluz comercializa un amplificador con una anchura de 200 nm y 15 dB de ganancia. Keopsys fabrica amplificadores con ganancias desde 17 dB hasta 40 dB para potencias de entrada de 0 dBm. La señal pulsada que se ha empleado en este trabajo equivale a una señal fuerte, por lo que los valores obtenidos pueden considerarse razonables.

Como alternativa, podrían lograrse mayores niveles de amplificación óptica con la sustitución de los elementos de la instalación, orientando los nuevos componentes hacia un perfil de pérdidas más bajo en la zona de mayor amplificación óptica, en torno a los 1850 nm. Asimismo, existe también la posibilidad de hacer el láser monocromático utilizando filtros en la longitud de onda deseada, dentro del rango de amplificación que presenta la fibra dopada (300 nm, aproximadamente). Existe además la posibilidad de hacerlo sintonizable, mediante la colocación de elementos selectores en el interior de la cavidad. De hecho, en la bibliografía se encuentran láseres de fibra dopada con tulio con un rango de sintonía de 250 nm [16].

5. Conclusiones

La realización del presente trabajo ha supuesto afrontar y superar numerosos retos. En primer lugar, en cuanto a los resultados científicos, debemos mencionar que se ha completado una instalación para el análisis y estudio de un láser de fibra óptica dopada con tulio. Al mismo tiempo, se han caracterizado los elementos necesarios para el montaje. Para la etapa de bombeo se han desarrollado dos posibilidades, una en modo continuo y otra en modo pulsado. En todos ellos se ha conseguido la emisión láser, con unas características que mencionaremos a continuación.

En el modo de trabajo con bombeo continuo, se ha encontrado que el bombeo umbral es de 137 mW. El espectro del láser muestra la competencia entre dos modos dentro de la cavidad, dando lugar a la aparición de dos picos entre 1910 y 1920 nm aproximadamente, cuya posición exacta depende de la potencia de bombeo. La recta característica del láser muestra una eficiencia en torno al 38%, lo cual puede considerarse aceptable teniendo en cuenta el material utilizado.

En el modo de bombeo pulsado por encadenado de modos, se ha encontrado que el bombeo umbral es ahora de 165 mW, ligeramente superior a la configuración con bombeo continuo. Encontramos la presencia de un modo de oscilación, que se desdobra en dos máximos de emisión a partir de una potencia de bombeo de 165 mW, a partir de la cual se mantienen diferenciados. La recta característica muestra una eficiencia en torno al 35%, ligeramente inferior a la obtenida con bombeo continuo.

Se ha estudiado también la ganancia espectral de la fibra dopada con tulio. Para ello se ha utilizado una instalación de emisión de supercontinuo como fuente para la caracterización. Se aprecia un buen factor de transmisión en la fibra dopada entre 1800 y 2000 nm, mientras que la cavidad muestra una buena transmisión entre 1850 y 1930 nm. La ganancia espectral muestra su máximo factor entre 1825 y 1875 nm mientras que en

torno a 1925 nm el factor de ganancia disminuye. Esta caída puede deberse a las pérdidas que inducen el resto de elementos de la instalación.

Por otro lado, podemos hablar acerca de las competencias adquiridas. Si bien en un principio el montaje de la instalación experimental no debería presentar demasiadas complicaciones, durante las sesiones de laboratorio hemos visto que requiere de destrezas prácticas no vistas en clases teóricas o prácticas de otras asignaturas. Asimismo, durante este trabajo hemos llevado a la práctica un amplio abanico de conocimientos adquiridos durante el grado, pertenecientes a numerosos ámbitos de la física (como puede ser la espectroscopía, interferometría, y física cuántica, entre muchos otros). De cara al futuro, tenemos ante nosotros una línea de proyecto que podría continuarse a través de una optimización de la instalación experimental. Tal y como comentábamos en secciones anteriores, los rendimientos (tanto en configuración de bombeo CW como en mode-locking) podrían mejorarse utilizando componentes mejor optimizados para tal fin. Si mejorásemos, además, la eficiencia en el método de soldadura entre fibra dopada y fibra convencional, se podría reducir el factor de pérdidas de forma considerable, permitiéndonos lograr una emisión más potente y estable. De la misma manera, con un sistema de medida más preciso (una resolución espectral del monocromador más pequeña, o un detector plenamente optimizado para el rango espectral utilizado) nuestras estimaciones de rendimiento y rectas características mejorarían notablemente. Nuestra instalación permite también la introducción de diversos dispositivos ópticos que nos posibilitarán conseguir diferentes efectos sobre la salida del láser. Así, sería posible la instalación de un filtro de longitudes de onda en la cavidad del láser de tulio para eliminar la competencia de modos que hemos observado en nuestras medidas experimentales. No obstante, esto sólo podría lograrse tras una optimización del rendimiento de la instalación, pues en general éste es un dispositivo que introduce numerosas pérdidas. También podría introducirse un segmento de fibra altamente no lineal para experimentar con emisión supercontinua en la zona de 2000 nm, aplicable a numerosos campos de la ciencia y tecnología (tal como comentábamos en la introducción). Por último, y como conclusión más importante del trabajo, cabe destacar la experiencia adquirida durante el mismo; no sólo en el ámbito científico y técnico, sino también en el ámbito personal y humano.

6. Bibliografía

- [1] Thulium Fiber Laser for LIDAR and Gas Sensing Systems 2016, consultado el 6 de abril de 2017, <<http://lasers4lab.com/wp/thulium-fiber-laser-for-lidar-and-gas-sensing-systems/>>
- [2] Hoult (2013), Understanding processing with thulium fiber lasers, 27 de noviembre, consultado el 7 de abril de 2017, <<http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/understanding-processing-with-thulium-fiber-lasers.html>>
- [3] Walsh, Brian (2009). Review of Tm and Ho materials; Spectroscopy and lasers. Laser Physics. 19, pp. 855-866.
- [4] Pal Atasi, (2013). Thulium-doped fiber laser in the 2 μm wavelength region for gas

sensing (Unpublished doctoral thesis), City University London, p. 70. Consultado el 25 de agosto de 2017, <http://openaccess.city.ac.uk/2989/1/Pal%2C_Atasi.pdf>

- [5] Jihong Geng, Jianfeng Wu, y Shibin Jiang, “Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm ,” *Opt. Lett.*, 32 (4): pp. 355-357 (2007).
- [6] J. Xu et al., Efficient double-clad thulium-doped fiber laser with a ring cavity, *Applied Optics*, vol. 40, pp. 1983-1988 (2001).
- [7] J. Geng et al., Efficient operation of diode-pumped single frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm , *Optics Letters*, vol. 32, pp. 355-357 (2007).
- [8] Y. Ju, The improvement of output characteristics on Tm^{3+} -doped all-fibre laser operating at 1908 nm, *Journal of Modern Optics*, vol. 64, pp. 1298-1301 (2017).
- [9] K. Yin et al., 300 W-level, wavelength-widely-tunable, all-fiber integrated thulium-doped fiber laser, *Optics Express*, vol. 24, pp. 11085-11090 (2016).
- [10] J. Wu et al., Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser, *Optics Letters*, vol. 32, pp. 638-640 (2006).
- [11] Z. Li et al., All-fiber, ultra-wideband tunable laser at 2 μm , *Optics Letters*, vol. 38, pp. 4739-4742 (2013).
- [12] S. Kharitonov et al., Isolator-free unidirectional thulium-doped fiber laser, *Light: Science & Applications*, vol. 4, e340 (2015).
- [13] S.D. Jackson, The spectroscopic and energy transfer characteristics of the rare earth ions used for silicate glass fibre lasers operating in the shortwave infrared, *Laser & Photon. Rev.*, 3: pp. 466–482.
- [14] C. W. Chang, S. Chi, Mode-locked erbium-doped fibre ring laser using nonlinear polarization rotation, *Journal of Modern Optics*, vol. 45, pp. 355-362 (1998).
- [15] C. Lavieja, S. Jarabo, M. Marín-Doñágueda, Í. J. Sola, Mode-locked erbium-doped fiber lasers as source for optical sensor networks over C and L bands, *Optical Fiber Technology*, vol. 19, pp. 476-481 (2013).
- [16] Z. Li et al., Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800-2050 nm window, *Optics Express*, vol. 21, pp. 26450-26455 (2013).
- [17] J. Wang et al., Broadband silica-based thulim doped fiber amplifier employing multi-wavelength pumping, *Optics Express*, vol. 24, pp. 23001- 23008 (2016).

